MODELO HÍBRIDO PASIVO PARA LA REDUCCIÓN DE MERMAS POSTCOSECHA DE LECHUGA

Reingeniería térmica, mecánica y económica del transporte en el eje Sabana de Bogotá–Corabastos

ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN · VERSIÓN AMPLIADA

Autor: Daniel Esteban Morales

Fecha: Octubre de 2025
Ubicación: Bogotá D.C., Colombia

Manuscrito elaborado tomando como documento base el archivo “Análisis Exhaustivo y Optimización del Transporte de Lechuga” suministrado para esta tarea. Los datos de telemetría se tratan como datos secundarios del documento base y no como una nueva campaña de campo independiente.

Documento técnico-académico · 48 páginas

Resumen. Resumen ejecutivo

La cadena de suministro de hortalizas de hoja en el corredor Sabana de Bogotá–Corabastos enfrenta una combinación de vulnerabilidades fisiológicas, térmicas, mecánicas y económicas. El documento base suministrado para esta investigación identifica como mecanismos centrales la acumulación de calor dentro de vehículos cubiertos, la pérdida de agua asociada con condiciones de humedad inadecuadas y la compresión de la carga cuando se utilizan embalajes deformables. A partir de ese material se construye un manuscrito ampliado que reorganiza el problema bajo una lógica de ingeniería de sistemas y evalúa una alternativa de transporte pasivo basada en canastillas estructurales de HDPE, barreras térmicas reflectantes, consolidación de la carga y aprovechamiento de ventanas de enfriamiento natural.

El análisis secundario utiliza 150 registros térmicos, tomados cada tres minutos en el núcleo de la carga de cinco vehículos comerciales, según la metodología descrita en el documento base. En los datos suministrados, las temperaturas del núcleo parten aproximadamente de 14,87–15,28 °C y alcanzan máximos entre 24,06 y 25,59 °C. La temperatura media calculada sobre los 150 intervalos se ubica entre 20,78 y 21,75 °C según vehículo. El patrón evidencia un incremento sostenido durante la tarde y un enfriamiento posterior incompleto.

La propuesta se formula como un modelo híbrido pasivo: no pretende sustituir universalmente la cadena de frío, sino reducir la carga térmica y mecánica antes, durante y después del trayecto. La literatura complementaria consultada confirma que la lechuga requiere temperaturas próximas a 0 °C y humedad relativa superior al 95 % para maximizar su vida poscosecha; por ello, un vehículo pasivo a temperatura ambiente no debe interpretarse como equivalente a refrigeración, sino como una estrategia de mitigación cuando la infraestructura de frío no está disponible o no resulta económicamente accesible.

Palabras clave: lechuga, postcosecha, logística hortícola, Sabana de Bogotá, Corabastos, HDPE, telemetría térmica, mermas, empaque reutilizable, cadena de frío.

Resumen. Abstract ampliado y aporte del estudio

This expanded research article reframes the supplied technical document as a secondary-data engineering study focused on postharvest loss prevention in leafy vegetables. The central proposition is that a meaningful share of logistics losses can be addressed through passive interventions that control mechanical load paths, solar heat gain, internal airflow and handling time, even when full active refrigeration is unavailable.

The work combines three evidence layers. First, it preserves the supplied document’s conceptual and numerical baseline, including the five-vehicle thermal dataset and the economic comparison between traditional sacks/tarpaulin handling and a reusable-crate/reflective-blanket model. Second, it adds external technical evidence from FAO and the University of California, Davis on temperature, relative humidity, respiration, water loss and packaging. Third, it develops an engineering framework for implementation, validation, risk management and economic sensitivity rather than treating the proposed solution as already proven at commercial scale.

The principal analytical finding is not that the passive model has already achieved an 85 % reduction in losses in a controlled trial; rather, the supplied document projects a reduction above 85 %, while the present article treats that figure as a design hypothesis requiring validation. This distinction is essential for academic rigor. The telemetry records support the existence of a thermal accumulation pattern in the source dataset, but they do not by themselves establish causality between temperature and final commercial rejection rates.

The proposed research agenda therefore moves from diagnosis to controlled pilot testing: baseline characterization, standardized loading, paired vehicle trials, continuous temperature and relative-humidity monitoring, mechanical-damage scoring, mass balance at origin and destination, and economic reconciliation after each trip. The result is a research-ready framework rather than an unsupported claim of field-wide performance.

1. Estructura del manuscrito

Sección	Contenido	Página
2	Planteamiento del problema	5
3	Preguntas, objetivos y hipótesis	7
4	Alcance, supuestos y limitaciones	9
5	Marco conceptual y fisiología poscosecha	11
6	Temperatura, respiración y humedad	14
7	Daño mecánico, compresión y vibración	17
8	Arquitectura logística del corredor Sabana–Corabastos	20
9	Metodología y trazabilidad de los datos	23
10	Resultados de la telemetría secundaria	26
11	Interpretación térmica y criterios de decisión	30
12	Diseño de la solución pasiva	33
13	Protocolo operativo de transporte	37
14	Modelo económico y sensibilidad	40
15	Impacto ambiental y sostenibilidad	43
16	Implementación, gobernanza y escalamiento	45
17	Plan de validación experimental	47
18	Discusión y conclusiones	50
Referencias	Bibliografía	53
Anexos	Datos, matrices y formatos	56

Nota editorial: la numeración de páginas del índice corresponde a la maquetación final del presente PDF y puede variar si se reabre el documento con otro motor de composición.

2. Planteamiento del problema

De la merma visible a la causa sistémica

La pérdida de calidad de una hortaliza de hoja no comienza necesariamente en el punto de venta. Puede originarse desde el momento de cosecha y amplificarse durante la selección, el embalaje, la espera, el transporte y la descarga. El problema logístico de la lechuga es especialmente sensible porque el producto continúa metabólicamente activo después de ser separado de la planta. La temperatura, la humedad y el daño físico interactúan; una decisión operativa aparentemente pequeña —por ejemplo, cubrir una carga con una lona impermeable— puede modificar simultáneamente la ventilación, la radiación absorbida y el intercambio de humedad.

El documento base sitúa el análisis en el eje de abastecimiento entre la Sabana de Bogotá y Corabastos y señala dos familias de fallas: estrés térmico y estrés mecánico. En el primer caso, se describe una acumulación de temperatura en el núcleo de la carga incluso cuando la temperatura exterior disminuye. En el segundo, se plantea que la deformabilidad de costales y sacos permite que el peso de las capas superiores se transmita al producto de las capas inferiores. Estas hipótesis son técnicamente plausibles y son compatibles con la literatura general sobre la función protectora del empaque, pero requieren pruebas estandarizadas para cuantificar su contribución relativa.

A escala nacional, el DNP informó en 2024 que Colombia había estimado pérdidas y desperdicios de 9,76 millones de toneladas de alimentos, equivalentes al 34 % de la oferta disponible según el estudio de 2016 citado por la entidad. El mismo reporte señala que frutas y verduras representaban 62 % de las pérdidas y desperdicios y que el transporte, almacenamiento y comercialización constituyen etapas prioritarias para mejorar la eficiencia. Este contexto convierte el problema local en un caso pertinente de política pública y gestión de cadenas alimentarias.

Problema central: ausencia de un sistema integrado de transporte que limite simultáneamente la transferencia de carga mecánica, la ganancia térmica solar, la acumulación de calor metabólico y el tiempo de exposición durante las esperas y descargas.

2.1. Árbol causal del deterioro

Nivel	Mecanismo	Manifestación	Consecuencia
Entrada	Producto cosechado caliente / sin pre-enfriamiento	Alta carga térmica inicial	Mayor velocidad de deterioro
Embalaje	Costales deformables	Compresión y movimiento relativo	Magulladuras y abrasión
Vehículo	Lona cerrada + baja ventilación	Acumulación de calor	Microclima desfavorable
Ruta	Vibración e irregularidad	Golpes repetidos	Daño dinámico
Espera	Fila y descarga prolongada	Exposición ambiental	Pérdida de calidad
Mercado	Clasificación por apariencia	Rechazo de unidades dañadas	Lucro cesante y desperdicio

La utilidad de este árbol causal es que evita reducir el problema a una única variable. La temperatura es importante, pero no explica por sí sola el deterioro. Un sistema puede presentar una temperatura aceptable y, aun así, generar pérdidas si la carga se comprime o vibra. De forma equivalente, un empaque mecánicamente protector puede perder eficacia si bloquea el flujo de aire o si prolonga el tiempo de exposición.

La reingeniería propuesta se diseña, por tanto, como una intervención multicriterio. El objetivo operativo no es “enfriar” de manera abstracta, sino disminuir el presupuesto térmico del viaje, proteger el producto de cargas concentradas, minimizar el tiempo entre cosecha y recepción y producir evidencia medible de cada resultado.

3. Preguntas, objetivos e hipótesis

Pregunta principal. ¿En qué medida un sistema logístico pasivo que combine embalaje estructural reutilizable, barrera reflectante y disciplina de tiempos puede reducir los mecanismos de deterioro identificados en el corredor Sabana de Bogotá–Corabastos?

Preguntas específicas. (1) ¿Qué patrón térmico aparece en los datos secundarios del documento base? (2) ¿Qué riesgos mecánicos son introducidos por el apilamiento deformable? (3) ¿Qué funciones debe cumplir una canastilla estructural? (4) ¿Qué papel tiene la barrera reflectante? (5) ¿Cuál es la estructura económica mínima para que el sistema sea atractivo? (6) ¿Qué indicadores deben utilizarse para validar el modelo en campo?

Objetivo general. Diseñar y evaluar conceptualmente un modelo híbrido pasivo de transporte de lechuga que integre control mecánico, mitigación térmica, reducción de tiempos y trazabilidad operativa.

Objetivos específicos. Caracterizar la cadena causal; analizar la telemetría secundaria; contrastar los supuestos con literatura técnica; diseñar el sistema de embalaje; construir un protocolo de operación; modelar el impacto económico; establecer una matriz de riesgos; y formular un plan de validación experimental.

Hipótesis de trabajo. Si la carga se organiza en unidades estructurales que transmiten las fuerzas por elementos rígidos y se reduce la ganancia térmica por radiación, entonces disminuirán las condiciones que favorecen el daño mecánico y el calentamiento del núcleo. La magnitud exacta de la reducción deberá determinarse mediante un ensayo controlado.

4. Alcance, supuestos y limitaciones

El presente artículo no pretende demostrar estadísticamente una reducción comercial de mermas a escala regional. Su alcance es el diseño técnico y la reinterpretación rigurosa del material suministrado. El conjunto de telemetría es tratado como una base secundaria: 150 intervalos de tres minutos, cinco vehículos, temperatura en el núcleo de la carga. El propio documento de origen describe el registro como una “simulación de vuelo”, por lo que el presente manuscrito no lo presenta como evidencia independiente de una campaña experimental nueva.

También se distingue entre tres tipos de afirmaciones: dato observado en el documento base, dato externo de literatura y proyección de diseño. Esta separación evita convertir una hipótesis de ingeniería en un resultado experimental. Por ejemplo, el documento base proyecta una merma cercana al 4 % para el modelo propuesto frente a 30 % para el tradicional; en este artículo esos porcentajes se citan como escenario económico y no como resultado validado.

La literatura consultada aporta un punto de referencia importante: UC Davis recomienda para lechuga temperaturas próximas a 0 °C y humedad relativa superior al 95 % para optimizar la vida poscosecha. Por tanto, el modelo pasivo debe entenderse como mitigación logística, no como sustituto universal de la refrigeración activa. Su función más razonable es actuar como puente entre condiciones ideales y condiciones reales de productores que carecen de infraestructura de frío.

Limitaciones clave: tamaño de muestra térmica reducido; ausencia de mediciones paralelas de humedad relativa; ausencia de grupo control contemporáneo; falta de pesaje individualizado de producto rechazado; falta de mediciones de vibración; y ausencia de una campaña económica auditada durante varios ciclos de viaje.

5. Marco conceptual y fisiología poscosecha

La hortaliza como sistema vivo

Después de la cosecha, la lechuga continúa respirando, perdiendo agua y respondiendo a su ambiente. La cadena logística debe tratarla como un tejido vivo y no como una mercancía inerte. Esta perspectiva cambia la prioridad del transporte: no basta con mover masa de origen a destino; hay que controlar el ambiente que rodea esa masa.

UC Davis reporta para lechuga romana tasas de respiración que aumentan con la temperatura y proporciona rangos de 9–12 mL CO_2/kg·h a 5 °C, 15–20 a 10 °C, 19–25 a 15 °C y 30–38 a 20 °C. La misma fuente recomienda >95 % de humedad relativa y señala que la pérdida de agua aumenta con temperaturas elevadas y humedad baja. Estas relaciones ayudan a interpretar la lógica del documento base: una carga que se calienta no solo recibe más energía externa; también entra en un entorno que acelera sus procesos fisiológicos.

La FAO destaca que la temperatura es uno de los factores ambientales más importantes para el deterioro de productos hortícolas y que el empaque influye en la ventilación, la temperatura y la humedad relativa. Para la lechuga, una guía técnica de FAO sitúa la referencia de almacenamiento alrededor de 0–1 °C, 95–100 % de HR y una vida de almacenamiento del orden de semanas bajo condiciones apropiadas. La consecuencia metodológica es clara: la temperatura del núcleo debe medirse, pero también deben registrarse humedad, tiempo y condición física.

5.1. Respiración y senescencia

La respiración convierte reservas orgánicas en energía metabólica y libera CO_2, agua y calor. En términos logísticos, el calor respiratorio es pequeño comparado con la radiación solar directa sobre un vehículo, pero puede convertirse en una contribución relevante cuando el volumen de producto es grande y el intercambio con el ambiente es limitado. El documento base describe este fenómeno como un ciclo de retroalimentación: mayor temperatura, mayor respiración y, bajo confinamiento, mayor acumulación térmica.

La relación de Van’t Hoff o factor Q_{10} puede emplearse como herramienta conceptual para expresar la sensibilidad de una tasa biológica a cambios de temperatura. Sin embargo, no debe aplicarse de manera automática a todo el rango térmico ni interpretarse como una ley exacta para la lechuga. La tasa real depende de cultivar, madurez, integridad del tejido, disponibilidad de oxígeno y condiciones previas a la cosecha.

La consecuencia práctica es que la operación debe atacar la temperatura desde el inicio. El preenfriamiento, cuando existe, reduce el presupuesto térmico; el sombreado evita una recarga rápida; la barrera reflectante limita radiación; y la consolidación estructural evita que la carga se convierta en una masa compacta que dificulte el intercambio de aire.

5.2. Pérdida de agua, humedad relativa y VPD

La pérdida de agua es una de las rutas más visibles de deterioro de las hojas. La humedad relativa determina el gradiente de vapor entre tejido y ambiente; por eso, el control de humedad es inseparable del control térmico. La FAO señala que la humedad relativa afecta pérdida de agua, desarrollo de deterioro y uniformidad del producto, y recomienda gestionar movimiento de aire, barreras de humedad y temperatura de los vehículos.

En el documento base se utiliza el concepto de déficit de presión de vapor (VPD) para explicar el flujo de agua. El valor exacto de VPD depende de temperatura y humedad relativa simultáneamente. Esto implica que una estrategia que simplemente “cierra” la carga puede ser contraproducente si produce condensación prolongada o limita la ventilación. La solución debe buscar un microambiente estable, no una cámara hermética improvisada.

Para futuras pruebas, se recomienda registrar temperatura y HR en al menos tres puntos: superficie externa, espacio intermedio y núcleo de carga. Con esos datos puede calcularse VPD y correlacionarlo con pérdida de masa, marchitez y rechazo visual. Esta medición permitiría comprobar si el beneficio de la manta térmica procede principalmente de la reducción de radiación, de la estabilización térmica o de cambios en el intercambio de humedad.

6. Daño mecánico, compresión y vibración

El documento base plantea que el embalaje deformable transfiere una parte importante de la carga vertical al producto. Desde la mecánica de materiales, la diferencia fundamental entre un sistema estructural y uno deformable es el camino de carga. Una canastilla correctamente diseñada puede llevar la fuerza de apilamiento a postes, nervaduras y esquinas, mientras que un saco transmite la fuerza a los tejidos contenidos en su interior.

La compresión no es el único riesgo. Durante la marcha, la vibración genera desplazamientos relativos y contacto repetido entre unidades. En una carga suelta, cada irregularidad de la vía puede traducirse en microimpactos. El documento base relaciona este problema con frecuencias de vibración y con la abrasión de las hojas. En una validación futura, esta afirmación debe probarse con acelerómetros montados en el vehículo y sensores dentro de la carga.

El indicador más útil no es únicamente “daño sí/no”. Se propone una escala de daño mecánico de cinco niveles: 0 = sin lesión visible; 1 = abrasión superficial; 2 = magulladura localizada; 3 = rotura de tejido; 4 = maceración o daño severo con riesgo de rechazo. La escala permite comparar tratamientos y construir una variable cuantitativa para el análisis estadístico.

6.1. Comparación funcional de embalajes

Función	Costal/lona	Canastilla HDPE	Implicación
Soporte vertical	Bajo	Alto	Menor compresión del producto
Apilamiento	Deformable	Estructurado	Camino de carga definido
Ventilación	Variable	Configurable	Mejor control del flujo
Reutilización	Baja	Alta	Amortización del activo
Limpieza	Dependiente del material	Lavable	Mejor control sanitario si se aplica protocolo
Trazabilidad	Baja	Alta	Identificación por unidad/pallet
Estabilidad de carga	Baja	Alta	Menos desplazamiento

La ventaja del embalaje estructural no debe expresarse como “cero daño”. Ningún contenedor elimina vibración, temperatura o errores de manipulación. La ventaja es que transforma un conjunto de riesgos difusos en variables controlables: altura de apilamiento, distribución de masa, ventilación, identificación de lote, limpieza y retorno.

7. Arquitectura logística del corredor Sabana–Corabastos

El corredor puede representarse como una secuencia de nodos: cosecha → consolidación en finca → espera → cargue → desplazamiento por vías secundarias → conexión con corredor principal → ingreso a Bogotá → espera de descarga → recepción y clasificación. Cada nodo agrega tiempo y puede alterar el estado térmico o mecánico del producto.

La principal oportunidad de ingeniería no necesariamente está en aumentar la velocidad del camión. Puede estar en reducir los tiempos muertos y la exposición. Si una carga permanece inmóvil bajo radiación, la potencia térmica recibida continúa actuando aunque el vehículo no esté recorriendo kilómetros. Por ello, la programación de llegada, la sombra en origen, la preparación anticipada del embalaje y la coordinación de descarga forman parte del sistema de conservación.

El DNP ha señalado que las centrales de abasto son actores relevantes para caracterizar las pérdidas y promover logística eficiente y sostenible. El caso de Corabastos es, por tanto, compatible con una estrategia de medición conjunta entre productores, transportadores, mayoristas y autoridades.

7.1. Mapa de proceso propuesto

Etapa	Control crítico	Indicador	Responsable
Cosecha	Sombra y selección	°C inicial / % rechazo	Productor
Preacondicionamiento	Enfriamiento o reposo protegido	°C tras 30–60 min	Productor
Embalaje	Canastilla + carga sin sobrellenado	kg/canastilla	Operario
Consolidación	Pallet/estiba estable	altura y masa	Jefe de patio
Transporte	Barrera reflectante + registro	°C / HR / tiempo	Transportador
Recepción	Descarga rápida y sombreada	minutos de espera	Central
Clasificación	Muestreo por lote	% daño mecánico	Mayorista

Este flujo incorpora una idea central: la unidad de control deja de ser el viaje completo y pasa a ser el lote trazable. Un lote puede tener identificación, hora de cosecha, hora de carga, temperatura inicial, vehículo, hora de llegada y resultado de recepción. Con ello, el productor puede identificar qué etapa generó la pérdida en lugar de atribuir todo el deterioro al “transporte”.

8. Metodología y trazabilidad de los datos

El estudio adopta un diseño de investigación aplicada con tres componentes: revisión documental, análisis secundario de telemetría y diseño de una propuesta logística. El documento suministrado se conserva como fuente primaria para los datos específicos del caso; las fuentes externas se utilizan para contrastar principios de fisiología y manejo poscosecha.

La unidad de observación térmica es un registro del núcleo de carga. La muestra disponible contiene 150 registros y cinco vehículos, para un total de 750 observaciones de temperatura. El intervalo temporal es de tres minutos. A partir de la tabla se calculan media, mediana, desviación estándar, mínimo, máximo, amplitud y diferencias entre vehículos.

La metodología evita inferencias causales que el diseño no permite. No se dispone de mediciones simultáneas de temperatura exterior, humedad relativa, masa inicial/final, daño visual ni grupo control. Por ello, el análisis estadístico se limita a describir patrones del conjunto de datos y a formular hipótesis para una futura validación.

8.1. Trazabilidad y clasificación de evidencia

Clase	Definición	Ejemplo en este artículo	Uso
A — fuente base	Contenido del PDF suministrado	150 registros térmicos	Descriptivo
B — literatura	Información externa verificable	0 °C y >95 % HR para lechuga	Contraste técnico
C — cálculo derivado	Resultado calculado sobre A	Medias, máximos, amplitud	Análisis
D — proyección	Escenario o diseño futuro	4 % de merma propuesta	No presentar como hecho

Esta clasificación es una de las mejoras principales frente a un informe técnico convencional: hace explícita la frontera entre evidencia y proyección. En especial, las cifras económicas del documento base se mantienen porque son parte del escenario original, pero no se convierten en resultados experimentales nuevos.

9. Resultados de la telemetría secundaria

Descripción estadística

Vehículo	Media °C	Mediana °C	DE °C	Mín. °C	Máx. °C	Amplitud °C
Camión 1	21.18	22.14	3.02	15.15	24.72	9.57
Camión 2	20.78	21.80	2.95	14.87	24.06	9.19
Camión 3	21.57	22.70	3.04	15.28	24.93	9.65
Camión 4	21.69	22.70	3.34	15.18	25.59	10.41
Camión 5	21.75	22.62	3.37	14.96	25.41	10.45

Los valores muestran un calentamiento progresivo desde el inicio del registro hasta un máximo vespertino. El Camión 2 presenta la menor media y el menor máximo, mientras que el Camión 4 registra el máximo absoluto del conjunto, 25,59 °C. La diferencia entre el máximo y el mínimo del Camión 4 es de 10,41 °C.

El resultado más importante no es un número aislado sino la forma de la serie. La carga no permanece alrededor de la temperatura inicial: acumula energía durante varias horas y luego reduce lentamente su temperatura. Esta dinámica es consistente con el concepto de “presupuesto térmico” del viaje: cada minuto a una temperatura elevada consume parte de la vida poscosecha disponible.

9.1. Perfil térmico de los cinco vehículos

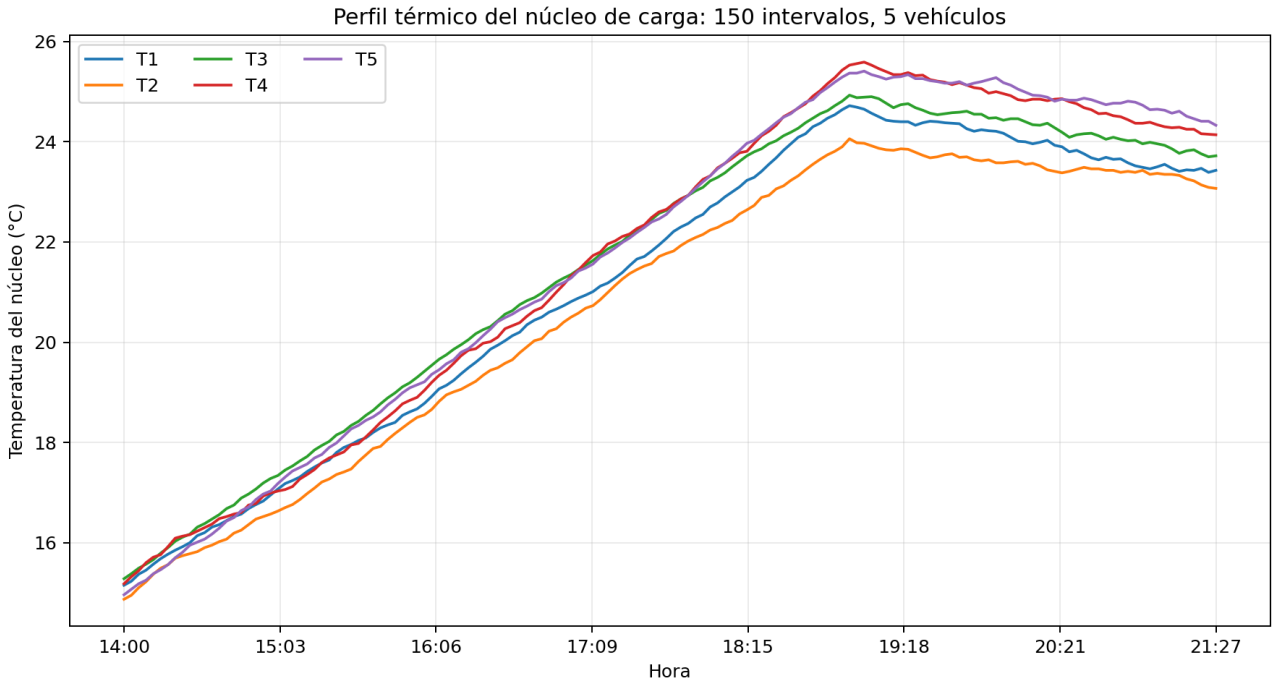

Figura 1. Reconstrucción gráfica de los 150 registros del documento base. El gráfico se utiliza como herramienta descriptiva; no se agregaron datos fuera de la tabla suministrada.

La figura permite observar la sincronía general entre vehículos y, al mismo tiempo, diferencias de magnitud. Los vehículos 4 y 5 alcanzan las temperaturas máximas más altas. La pendiente de calentamiento no es idéntica, lo que sugiere que la posición de la carga, el tipo de vehículo, el grado de cobertura o las condiciones operativas podrían influir.

En un ensayo nuevo, estas diferencias deberían relacionarse con variables explicativas registradas de forma simultánea: temperatura ambiente, radiación, masa de producto, porcentaje de ocupación del volumen, hora de cargue, duración de espera y apertura de puertas.

9.2. Comparación de temperaturas medias

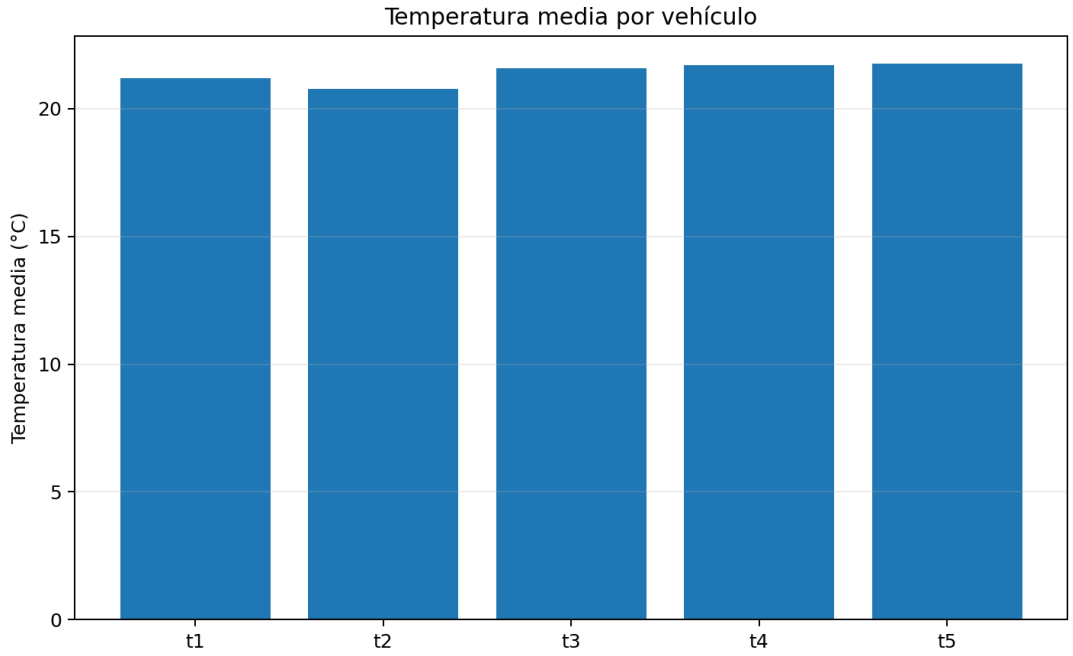

Figura 2. Temperatura media por vehículo calculada sobre los 150 intervalos.

Las medias se encuentran entre 20.78 y 21.75 °C, una diferencia de 0.97 °C entre el vehículo de menor y mayor media. Esta variación es suficientemente grande para justificar el registro por vehículo en futuras campañas, pero no debe interpretarse como una comparación causal porque no conocemos las condiciones externas de cada unidad.

9.3. Máximos y exposición a temperaturas elevadas

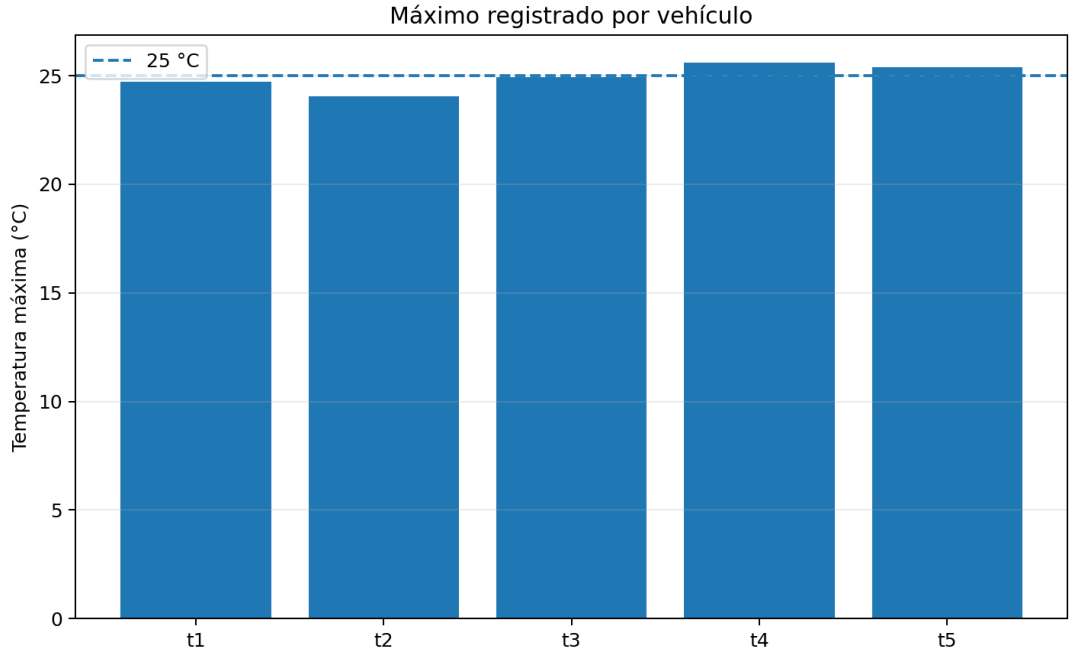

Figura 3. Máximos registrados por vehículo. La línea de 25 °C se incluye como referencia visual, no como un umbral universal de daño.

El Camión 4 alcanza 25,59 °C y el Camión 5 25,41 °C. El Camión 2 permanece por debajo de 25 °C en el conjunto disponible. La literatura de UC Davis muestra que la respiración de la lechuga aumenta al aumentar la temperatura; por ello, reducir el tiempo de exposición a las condiciones máximas constituye una prioridad, aunque la temperatura óptima poscosecha real sea mucho menor.

9.4. Análisis por bandas térmicas

Vehículo	<15	15-<18	18-<21	21-<24	24-<27	>=27
Camión 1	0	32	32	53	33	0
Camión 2	2	34	31	82	1	0
Camión 3	0	28	30	42	50	0
Camión 4	0	33	26	28	63	0
Camión 5	1	29	28	28	64	0

Las bandas muestran cómo la distribución se desplaza desde temperaturas iniciales cercanas a 15 °C hacia valores superiores a 21 °C durante buena parte del registro. No se utilizan estas bandas como límites fisiológicos de daño; son categorías descriptivas para identificar cuánto tiempo pasa cada vehículo en diferentes estados térmicos.

Para una campaña experimental, las bandas deberían sustituirse por indicadores basados en tiempo-temperatura, por ejemplo grados-hora acumulados por encima de un umbral previamente definido por el producto y el protocolo de calidad. Esto permite comparar viajes de distinta duración.

10. Interpretación térmica y criterios de decisión

El documento base interpreta la divergencia entre temperatura interna y exterior como evidencia de una “trampa de calor”. La telemetría disponible sí muestra acumulación interna durante la tarde y persistencia de temperaturas elevadas, pero no contiene una serie exterior contemporánea que permita calcular directamente el Delta T. Por rigor, este artículo denomina el patrón “acumulación térmica interna” y reserva la demostración del Delta T para una prueba futura con sensores externos.

El criterio de decisión propuesto es operativo: si la temperatura del núcleo sube mientras el vehículo permanece estacionado, la prioridad es reducir radiación y tiempo de espera; si sube principalmente durante movimiento diurno, debe evaluarse la radiación sobre la carrocería y la ventilación; si permanece elevada después de anochecer, debe revisarse la carga inicial, el aislamiento y el intercambio de aire.

Este enfoque transforma la telemetría en una herramienta de diagnóstico. En lugar de usar un único valor de temperatura al llegar a Corabastos, se observa la trayectoria completa. Dos viajes pueden llegar a la misma temperatura final y, sin embargo, haber experimentado exposiciones térmicas muy distintas.

11. Diseño de la solución pasiva

Arquitectura del sistema

La solución propuesta se estructura en cuatro capas: (1) preparación del producto, (2) contención mecánica, (3) protección térmica y (4) control operativo. El objetivo es que cada capa reduzca una familia de riesgos sin generar nuevos riesgos mayores.

Capa 1 — Producto: cosecha en horas de menor carga térmica, selección de unidades dañadas y reducción del tiempo entre corte y consolidación. Capa 2 — Estructura: canastillas HDPE con capacidad de apilamiento y superficies internas compatibles con la hoja. Capa 3 — Barrera: manta reflectante con superficie de baja emisividad, evitando contacto que produzca condensación o bloqueo total del flujo. Capa 4 — Operación: programación, trazabilidad, inspección y descarga rápida.

El sistema debe considerarse modular. No todos los productores necesitarán la misma cantidad de canastillas ni la misma cobertura. La configuración puede variar con la distancia, la hora de salida, la temperatura ambiental, la capacidad del vehículo y la disponibilidad de puntos de sombra o enfriamiento.

11.1. Ingeniería de canastillas HDPE

El HDPE se propone como material estructural porque permite fabricar contenedores rígidos, lavables y reutilizables. La característica decisiva no es simplemente que el plástico sea resistente, sino que la geometría de la canastilla establezca un camino de carga predecible. Las esquinas, nervaduras y puntos de apoyo deben transmitir el peso de la pila sin concentrarlo sobre las hojas.

El diseño debe especificar dimensiones, masa propia, carga nominal, carga de apilamiento, ventilación, radio de bordes, facilidad de lavado y compatibilidad con estibas. También debe incluir un sistema de identificación para registrar lote y propietario. En términos de mantenimiento, una canastilla que se deforma, rompe o acumula suciedad pierde su ventaja estructural y sanitaria.

No se recomienda asumir que cualquier canastilla comercial cumple automáticamente el objetivo. El prototipo debe someterse a pruebas de carga estática, apilamiento, vibración y caída controlada antes de incorporarse al flujo comercial. El diseño final debe equilibrar resistencia, peso, costo y ergonomía del operario.

11.2. Barrera térmica reflectante

El documento base propone una manta compuesta por una cara reflectante de aluminio y un núcleo alveolar. El principio físico es reducir la radiación absorbida y añadir una resistencia térmica por aire atrapado. La cara reflectante funciona mejor cuando existe una superficie de aire que permita que la baja emisividad tenga efecto; el contacto directo con otra superficie puede disminuir ese beneficio.

El uso de la manta no debe convertir la carga en un recipiente hermético. La barrera térmica debe combinarse con una estrategia de ventilación y, cuando sea posible, con carga previamente enfriada. De lo contrario, puede reducir la ganancia solar y al mismo tiempo retener calor metabólico. Esta es una de las razones por las que el modelo se denomina híbrido: aislamiento, ventilación y tiempo deben diseñarse conjuntamente.

La manta debe evaluarse mediante una comparación A/B: vehículo o zona con manta frente a control con embalaje convencional, manteniendo constantes hora, masa, ruta y tipo de producto. El resultado primario sería la diferencia en temperatura-tiempo del núcleo; los secundarios serían pérdida de masa, daño visual y porcentaje comercializable.

11.3. Ventana de enfriamiento natural

El documento base utiliza el concepto de “Free Cooling” para aprovechar horas de menor temperatura ambiental. La idea es válida como estrategia de reducción de carga térmica, pero no equivale a alcanzar las condiciones de almacenamiento recomendadas para la lechuga. Si el producto parte de una temperatura elevada, el enfriamiento nocturno puede reducirla parcialmente, pero no necesariamente llevarla a 0–5 °C.

La ventana de enfriamiento debe programarse con base en datos locales de temperatura y humedad, no solamente por horario fijo. El protocolo propuesto es: cosechar o consolidar en horas frescas, proteger del sol, iniciar transporte cuando la temperatura externa sea favorable y minimizar paradas posteriores. Si existe infraestructura de preenfriamiento, esta debe tener prioridad sobre el enfriamiento pasivo.

El valor del método pasivo aumenta cuando se utiliza como complemento. Una reducción de algunos grados antes de la salida puede disminuir la velocidad de calentamiento y ampliar el margen operativo durante el trayecto, aunque la magnitud debe medirse experimentalmente.

12. Protocolo operativo de transporte

Momento	Acción	Criterio de aceptación
Antes de cosecha	Preparar canastillas limpias y zona de sombra	100 % disponibles y limpias
Cosecha	Evitar exposición solar directa	Producto protegido inmediatamente
Selección	Separar unidades con daño visible	Lote homogéneo
Carga	No sobrellenar; respetar capacidad	Sin deformación del producto
Estiba	Alinear apoyos estructurales	Pila estable
Cobertura	Instalar manta sin sellar ventilación	Superficie reflectante expuesta
Salida	Registrar hora y temperatura inicial	Registro completo
Ruta	Registrar temperatura cada 3 min	Sin interrupciones del logger
Recepción	Descarga prioritaria	Tiempo de espera mínimo
Cierre	Pesaje y clasificación de muestra	% merma y daño registrados

El protocolo convierte la propuesta en una secuencia auditable. La disciplina operativa es tan importante como el material: una canastilla correctamente diseñada pierde eficacia si se sobrecarga, se deja al sol o permanece horas esperando descarga.

12.1. Procedimiento estándar de operación (SOP)

Paso 1 — Preparación. Verificar integridad, limpieza, identificación y disponibilidad de canastillas y mantas. Paso 2 — Cosecha. Mantener el producto bajo sombra y reducir el intervalo entre corte y embalaje. Paso 3 — Consolidación. Distribuir masa de forma uniforme y mantener los apoyos estructurales alineados. Paso 4 — Protección. Instalar la barrera reflectante dejando la configuración de ventilación prevista. Paso 5 — Registro. Activar el registrador térmico y anotar hora, lote, vehículo y condición inicial.

Paso 6 — Transporte. Evitar aperturas innecesarias y registrar eventos extraordinarios. Paso 7 — Recepción. Descargar sin sol directo y medir temperatura del núcleo. Paso 8 — Evaluación. Seleccionar una muestra definida previamente y clasificar daño. Paso 9 — Balance. Comparar masa inicial comercializable con masa recibida y rechazada. Paso 10 — Retroalimentación. Registrar la causa probable de cada pérdida y actualizar el tablero de indicadores.

La SOP debe ser suficientemente simple para que un operario pueda ejecutarla en campo y suficientemente precisa para que un investigador pueda reproducirla. Las instrucciones críticas deben estar acompañadas por fotografías o diagramas del montaje final cuando el piloto sea implementado.

12.2. Matriz de riesgos

Riesgo	Prob.	Impacto	Nivel	Mitigación
Sobrellenado	Media	Alto	Alto	Capacidad nominal y control de masa
Acumulación de calor	Alta	Alto	Crítico	Manta + sombra + tiempo
Condensación	Media	Medio	Medio	Ventilación y control de HR
Rotura de canastilla	Baja	Alto	Medio	Inspección y ensayo de carga
Suciedad microbiológica	Media	Alto	Alto	Lavado, secado y trazabilidad
Espera en recepción	Alta	Alto	Crítico	Coordinación de descarga
Pérdida de activos	Media	Medio	Medio	Código y registro de retorno
Datos incompletos	Media	Medio	Medio	Checklist de telemetría

La matriz prioriza los riesgos que pueden anular el beneficio del sistema. En particular, la espera de descarga merece tratamiento como variable logística y no como una externalidad. Un sistema que conserva bien la carga durante el trayecto pero deja el producto horas bajo condiciones desfavorables puede perder gran parte de su ventaja.

12.3. Tablero de indicadores (KPI)

KPI	Fórmula	Frecuencia	Meta inicial de piloto
Temperatura máxima	máx(T núcleo)	Cada viaje	Reducir vs. control
Carga térmica	Σ(T−Tref)·Δt	Cada viaje	Comparar A/B
Pérdida de masa	(M0−Mf)/M0	Cada lote	Reducir vs. control
Daño mecánico	Σ puntuación / n	Cada lote	Reducir vs. control
Merma comercial	kg rechazados / kg iniciales	Cada viaje	Reducir vs. control
Tiempo de espera	minutos	Cada viaje	Disminuir
Costo por kg vendido	costo total / kg comercializable	Cada viaje	Disminuir
Retorno de activos	viajes / activo	Mensual	Determinar punto de equilibrio

El KPI principal no debe ser únicamente temperatura. El objetivo económico final es aumentar kilogramos comercializables por viaje y reducir costo por kilogramo vendido. Por ello, el tablero combina variables físicas, operativas y financieras.

13. Modelo económico y sensibilidad

El documento base presenta un escenario para un viaje de cuatro toneladas netas. Reporta un costo operativo de embalaje de $120.000 COP para el modelo tradicional y $250.000 COP para el modelo propuesto, junto con una merma física estimada de 30 % frente a aproximadamente 4 %. También proyecta un impacto económico de –$3.000.000 COP frente a –$400.000 COP y una recuperación neta de $2.470.000 COP por viaje en el escenario propuesto.

Estas cifras se incorporan aquí como escenario económico de referencia, no como resultado auditado. Para convertirlas en una evaluación financiera, deben vincularse con precio real de venta, número de unidades por canastilla, costo de retorno, tasa de pérdida de activos, mano de obra, lavado, depreciación y frecuencia anual de viajes.

El criterio financiero recomendado es costo por kilogramo comercializable, no costo de embalaje por viaje. Un embalaje más caro puede ser económicamente superior si evita suficiente merma y si el activo puede reutilizarse muchas veces. El análisis debe calcular el punto de equilibrio de viajes necesarios para recuperar la inversión inicial.

13.1. Escenario de merma reportado por el documento base

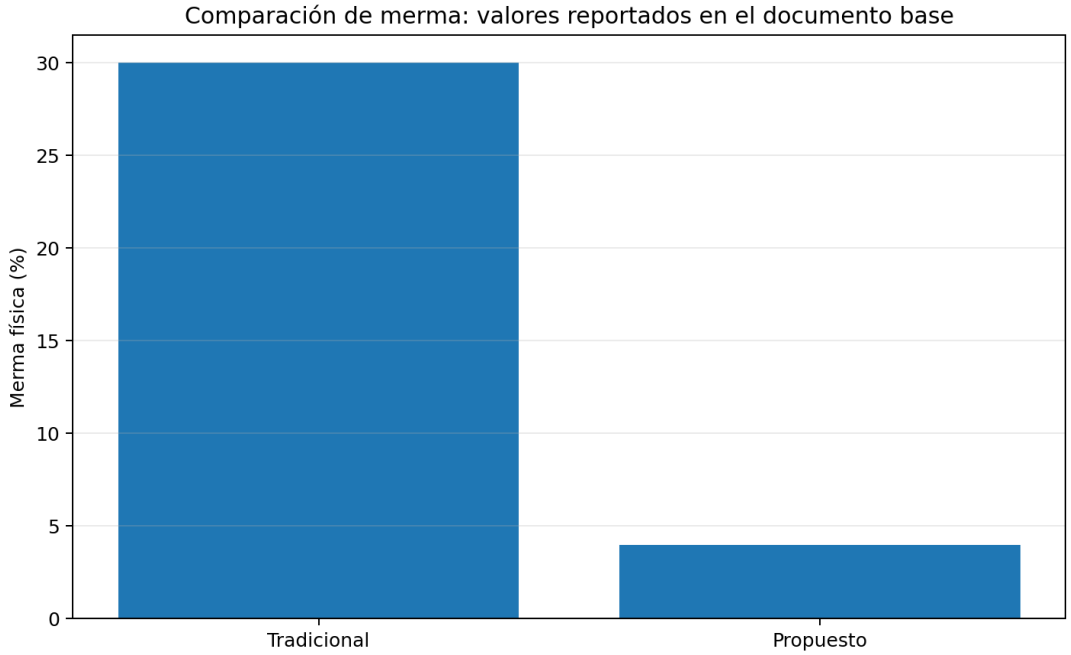

Figura 4. Comparación de merma física reportada en el escenario del documento base: 30 % para el modelo tradicional y aproximadamente 4 % para el propuesto.

La diferencia de 26 puntos porcentuales es grande y, por tanto, financieramente atractiva si se confirma en campo. Precisamente por ser una diferencia grande, la primera campaña de validación debe concentrarse en comprobarla con una metodología de muestreo robusta. Un resultado menor pero estadísticamente confiable puede ser más útil para la toma de decisiones que una proyección muy favorable sin grupo control.

13.2. Análisis de sensibilidad

Variable	Escenario bajo	Base	Escenario alto	Qué cambia
Merma tradicional	20 %	30 %	40 %	Pérdida evitada
Merma propuesta	8 %	4 %	10 %	Eficacia del sistema
Costo de embalaje	$180k	$250k	$320k	Costo por viaje
Viajes/año	50	100	180	Amortización
Precio neto/kg	$1.800	$2.500	$3.200	Valor recuperado

La sensibilidad debe recalcularse con precios reales antes de una inversión. En particular, el valor de la merma evitada depende de si el producto rechazado tiene algún mercado secundario o carece completamente de valor comercial. La recuperación de capital también depende de cuántos viajes se realizan por año y de la tasa de reposición de canastillas.

14. Impacto ambiental y sostenibilidad

La reducción de pérdidas puede generar beneficios ambientales porque evita producir, transportar y gestionar residuos que no llegan a convertirse en alimento vendido. El documento base vincula la merma evitada con la reducción de biomasa enviada a disposición final. La FAO, por su parte, presenta la reducción de pérdidas poscosecha como una dimensión de eficiencia de la cadena y destaca el papel del empaque en la protección del producto.

La sostenibilidad del modelo no debe evaluarse solo por la reducción de desperdicio. Las canastillas HDPE requieren fabricación, lavado, transporte de retorno y eventual disposición al final de su vida útil. Por ello, el análisis ambiental completo debe considerar el ciclo de vida del activo y compararlo con el número de embalajes desechables que sustituye.

Se propone un indicador simple de piloto: kg de producto comercializable recuperados por kilogramo de material de embalaje adicional utilizado. A este indicador pueden añadirse viajes de retorno, consumo de agua de lavado, energía de limpieza y vida útil del contenedor. El resultado permitiría evaluar si la solución es ambientalmente superior además de económicamente atractiva.

15. Implementación, gobernanza y escalamiento

La transición requiere coordinación entre productor, transportador, central mayorista y entidades públicas. El documento base propone líneas de financiación y un esquema de descarga prioritaria para vehículos que cumplan protocolos. Estas ideas pueden convertirse en instrumentos de política si se acompañan de criterios medibles y verificables.

Productor: controla cosecha, selección y carga. Transportador: controla vehículo, telemetría y tiempos. Mayorista: controla recepción y velocidad de descarga. Entidad técnica: define protocolos y audita resultados. Entidad financiera: facilita la adquisición de activos cuando el retorno esté demostrado.

El escalamiento debería ser gradual. Primera fase: 5–10 viajes piloto. Segunda: 30–50 viajes con diversidad de productores y condiciones. Tercera: adopción comercial con indicadores mínimos. Cuarta: estandarización y certificación voluntaria. Cada fase debe tener un criterio de “continuar/no continuar” basado en evidencia.

15.1. Diseño de piloto controlado

Componente	Tratamiento A	Tratamiento B
Embalaje	Costal/lona habitual	Canastilla HDPE
Protección térmica	Convencional	Manta reflectante
Vehículo	Misma categoría	Misma categoría
Hora	Emparejada	Emparejada
Masa	±5 %	±5 %
Ruta	Misma	Misma
Medición	T, HR, masa, daño	T, HR, masa, daño
Resultado	% comercializable	% comercializable

El diseño debe ser pareado siempre que sea posible: dos viajes similares en hora, ruta, masa y tipo de producto. La asignación del tratamiento debe alternarse o aleatorizarse para evitar que todos los viajes mejorados coincidan con condiciones climáticas favorables.

El tamaño de muestra definitivo debe calcularse con base en la variabilidad de la merma observada en una fase piloto. No se recomienda fijar arbitrariamente un número de viajes sin conocer la dispersión de los resultados.

15.2. Plan de validación experimental

La validación debe medir simultáneamente variables de entrada, proceso y salida. Las variables de entrada incluyen temperatura inicial, madurez, masa y hora de cosecha. Las variables de proceso incluyen temperatura y HR en tres posiciones, aceleración/vibración, tiempo de espera, aperturas del vehículo y condición de la manta. Las variables de salida incluyen masa comercializable, masa rechazada, puntuación de daño y precio efectivamente recibido.

El análisis estadístico puede incluir modelos de medidas repetidas para temperatura, comparación de medias o medianas de merma, regresión para explicar rechazo y análisis de supervivencia comercial si se sigue el producto durante varios días. Para una primera campaña, un diseño más simple y transparente puede ser preferible: diferencias pareadas, intervalos de confianza y gráficos de distribución.

La calidad de los datos debe auditarse. Cada logger debe tener identificación, hora sincronizada y comprobación de batería. Cada lote debe tener un código único. Las fotografías de recepción deben conservarse para respaldar la clasificación de daño. Así, el estudio puede pasar de un informe descriptivo a un sistema de evidencia reproducible.

16. Discusión

La principal contribución del presente artículo es integrar fisiología, ingeniería de embalaje y logística en una misma arquitectura de decisión. El documento base ya proponía HDPE, manta reflectante y aprovechamiento de la ventana nocturna. La ampliación realizada aquí introduce una distinción entre evidencia observada y proyección, incorpora literatura externa y convierte la propuesta en un protocolo susceptible de prueba.

La telemetría secundaria respalda una conclusión descriptiva: existe un patrón de acumulación térmica en el núcleo de la carga durante el periodo observado. Sin embargo, no demuestra por sí sola que esa acumulación sea la causa dominante de la merma. El daño puede ser térmico, mecánico, hídrico o una interacción de los tres. Esta cautela no debilita el proyecto; lo hace más defendible académicamente.

La literatura externa introduce además un matiz importante: la temperatura óptima para la lechuga es mucho menor que las temperaturas observadas en el conjunto secundario. Por ello, el modelo pasivo debe presentarse como una estrategia de mitigación para escenarios sin frío suficiente, mientras que el preenfriamiento y la cadena de frío continúan siendo la referencia cuando están disponibles.

16.1. Contribuciones técnicas y académicas

Contribución	Valor
Reorganización causal	Integra temperatura, humedad, mecánica y tiempos
Trazabilidad	Distingue dato base, literatura, cálculo y proyección
Telemetría	Convierte 750 observaciones en indicadores comparables
Diseño	Define funciones de canastilla, manta y operación
Economía	Traslada el foco de costo/viaje a costo/kg comercializable
Validación	Propone un piloto A/B reproducible
Gobernanza	Distribuye responsabilidades entre actores de la cadena

El artículo puede utilizarse como documento de base para una investigación experimental posterior, un proyecto de grado o una propuesta de innovación logística. Antes de presentarlo como estudio experimental, deben añadirse datos primarios obtenidos bajo el protocolo descrito.

17. Conclusiones y recomendaciones

1. La telemetría secundaria del documento base muestra una acumulación térmica clara en el núcleo de cinco vehículos durante 150 intervalos de tres minutos. Los máximos alcanzan hasta 25,59 °C y las medias se sitúan alrededor de 21 °C.

2. La literatura técnica confirma que la lechuga tiene requerimientos poscosecha exigentes, con temperaturas próximas a 0 °C y humedad relativa superior al 95 % para maximizar su vida útil. Por tanto, el transporte pasivo no debe presentarse como equivalente a refrigeración.

3. La canastilla estructural de HDPE tiene sentido como mecanismo de control del camino de carga y de reducción de compresión directa sobre el producto. Su eficacia depende de diseño, carga nominal, ventilación, limpieza y mantenimiento.

4. La manta reflectante puede reducir la ganancia por radiación, pero debe combinarse con ventilación y control del calor metabólico. El aislamiento no debe convertirse en una cámara hermética improvisada.

5. Las cifras de 30 % frente a 4 % de merma y el ahorro de $2.470.000 COP por viaje pertenecen al escenario reportado en el documento base y deben validarse mediante un piloto controlado antes de utilizarse como resultados de inversión.

6. La estrategia más robusta es híbrida: preparación del producto + embalaje estructural + barrera térmica + programación + descarga rápida + telemetría.

Recomendación final: ejecutar un piloto pareado de al menos varias decenas de viajes antes de escalar. La decisión de inversión debe basarse en kg comercializables, costo por kg vendido, temperatura-tiempo, daño mecánico y vida útil de los activos.

Referencias. Bibliografía seleccionada

[1] Agüero, M. V., Ponce, A. G., Moreira, M. R., & Roura, S. I. (2011). Lettuce quality loss under conditions that favor the wilting phenomenon. Postharvest Biology and Technology, 59(2), 124–131. DOI: 10.1016/j.postharvbio.2010.08.018.

[2] Guo, Z., Liu, H., Chen, X., Huang, L., Fan, J., Zhou, J., Chang, X., Du, B., & Chang, X. (2019). Modified-atmosphere packaging maintains the quality of postharvest whole lettuce. Postharvest Biology and Technology, 147, 206–213. DOI: 10.1016/j.postharvbio.2018.09.001.

[3] Kim, J. G., Luo, Y., Saftner, R. A., & Gross, K. C. (2005). Effect of delayed packaging and modified atmosphere packaging on quality of fresh-cut romaine lettuce. Journal of the American Society for Horticultural Science, 130, 116–123.

[4] Kurubas, M. S., Maltas, A. S., Dogan, A., Kaplan, M., & Erkan, M. (2019). Comparison of organically and conventionally produced Batavia type lettuce stored in modified atmosphere packaging. Journal of the Science of Food and Agriculture, 99, 226–234. DOI: 10.1002/jsfa.9164.

[5] Shamsi, S. M., El Pebrian, D., Mustaffha, S., Sulaiman, H., Zahari, M. K., & Ghazali, N. A. A. (2025). Lettuce postharvest quality: Affordable packaging and storage durations. Advances in Horticultural Science, 39(2), 93–100. DOI: 10.36253/ahsc-16106.

[6] Rajkowski, K. T., et al. (2016). Transit temperatures experienced by fresh-cut leafy greens during cross-country shipment. Food Control, 61, 146–155.

[7] University of California, Davis, Postharvest Research and Extension Center. Lettuce (Romaine and Loose-Leaf): postharvest handling and storage. Fuente técnica consultada para temperatura, humedad relativa, respiración y pérdida de agua.

[8] FAO. The role of post-harvest management in assuring the quality and safety of horticultural produce. Documento técnico sobre empaque, temperatura, humedad relativa, enfriamiento y transporte.

[9] FAO. Good practice in the design, management and operation of a fresh produce packing-house. Tabla técnica de temperatura y humedad relativa para hortalizas, incluida lechuga.

[10] Departamento Nacional de Planeación (DNP). (2024). El DNP se une con las centrales de abastos para fortalecer los procesos logísticos y la reducción de pérdida de alimentos.

[11] Documento base suministrado por el usuario. (2026). Análisis Exhaustivo y Optimización del Transporte de Lechuga: Reducción de Mermas Postcosecha y Reingeniería Logística en el Eje Sabana de Bogotá–Corabastos. PDF de 32 páginas.

Nota: las referencias [7]–[10] se incorporaron como contraste técnico externo. Las cifras de telemetría y los escenarios económicos específicos proceden del documento base suministrado.

Anexo A. Resumen de datos de telemetría

Indicador	Resultado
Número de vehículos	5
Registros por vehículo	150
Intervalo de registro	3 min
Total de observaciones	750
Inicio	14:00
Fin	21:27
Mínimo global	14,87 °C
Máximo global	25,59 °C
Vehículo con máximo global	Camión 4
Media global de las 750 observaciones	21.39 °C

Los registros fueron extraídos del PDF suministrado y reorganizados sin modificar los valores numéricos. Los cálculos estadísticos de este anexo son derivados y se presentan para facilitar auditoría y reproducción.

Anexo B. Muestra de registros originales

Hora	Camión 1	Camión 2	Camión 3	Camión 4	Camión 5
14:00	15.15	14.87	15.28	15.18	14.96
14:15	15.68	15.49	15.79	15.76	15.46
14:30	16.14	15.82	16.31	16.23	16.01
14:45	16.52	16.19	16.75	16.57	16.50
15:00	16.95	16.57	17.28	16.99	17.03
15:15	17.42	16.98	17.72	17.36	17.57
15:30	17.90	17.41	18.22	17.81	18.13
15:45	18.29	17.92	18.77	18.40	18.61
16:03	18.78	18.55	19.42	19.04	19.21
16:18	19.37	19.06	19.95	19.73	19.80
16:33	19.94	19.49	20.43	20.10	20.41
16:48	20.44	20.03	20.89	20.63	20.80
17:03	20.81	20.50	21.35	21.32	21.28
17:18	21.18	20.99	21.86	21.96	21.78
17:33	21.71	21.52	22.32	22.34	22.29
17:51	22.37	22.02	22.93	22.93	22.93
18:06	22.90	22.37	23.38	23.57	23.57
18:21	23.41	22.89	23.86	24.12	24.15
18:36	24.09	23.32	24.27	24.67	24.68
18:51	24.54	23.81	24.72	25.28	25.19
19:06	24.57	23.92	24.90	25.53	25.34
19:21	24.40	23.85	24.76	25.38	25.34
19:39	24.37	23.76	24.58	25.14	25.17
19:54	24.22	23.64	24.47	24.97	25.24
20:09	24.00	23.55	24.40	24.82	24.99
20:24	23.90	23.38	24.19	24.86	24.85
20:39	23.64	23.46	24.12	24.56	24.79
20:54	23.52	23.39	24.03	24.37	24.79
21:09	23.47	23.35	23.86	24.28	24.57
21:27	23.43	23.07	23.72	24.14	24.33

Se presenta una muestra estratificada de 30 registros para facilitar lectura. El conjunto completo contiene 150 intervalos por vehículo y puede reconstruirse desde la tabla del documento base.

Anexo C. Tabla completa de telemetría — Parte I

Hora	Camión 1	Camión 2	Camión 3	Camión 4	Camión 5
14:00	15.15	14.87	15.28	15.18	14.96
14:03	15.23	14.95	15.38	15.32	15.07
14:06	15.37	15.10	15.49	15.44	15.18
14:09	15.45	15.22	15.57	15.60	15.25
14:12	15.57	15.37	15.66	15.71	15.38
14:15	15.68	15.49	15.79	15.76	15.46
14:18	15.77	15.56	15.90	15.92	15.56
14:21	15.85	15.69	16.03	16.09	15.70
14:24	15.92	15.74	16.11	16.13	15.81
14:27	16.00	15.78	16.17	16.16	15.95
14:30	16.14	15.82	16.31	16.23	16.01
14:33	16.20	15.90	16.38	16.30	16.07
14:36	16.31	15.95	16.47	16.37	16.17
14:39	16.36	16.02	16.56	16.48	16.29
14:42	16.44	16.07	16.68	16.52	16.43
14:45	16.52	16.19	16.75	16.57	16.50
14:48	16.57	16.25	16.89	16.60	16.64
14:51	16.68	16.36	16.97	16.75	16.71
14:54	16.76	16.47	17.07	16.78	16.86
14:57	16.83	16.52	17.19	16.93	16.97
15:00	16.95	16.57	17.28	16.99	17.03
15:03	17.07	16.63	17.34	17.03	17.18
15:06	17.18	16.70	17.45	17.06	17.31
15:09	17.24	16.76	17.53	17.12	17.43
15:12	17.31	16.86	17.63	17.27	17.50
15:15	17.42	16.98	17.72	17.36	17.57
15:18	17.51	17.09	17.85	17.46	17.69
15:21	17.59	17.21	17.94	17.60	17.76
15:24	17.65	17.27	18.02	17.69	17.90
15:27	17.80	17.36	18.15	17.75	17.99
15:30	17.90	17.41	18.22	17.81	18.13
15:33	17.96	17.47	18.34	17.95	18.27
15:36	18.04	17.62	18.42	17.98	18.34
15:39	18.09	17.75	18.54	18.11	18.44
15:42	18.20	17.88	18.64	18.25	18.51
15:45	18.29	17.92	18.77	18.40	18.61

Hora	Camión 1	Camión 2	Camión 3	Camión 4	Camión 5
15:48	18.35	18.06	18.89	18.51	18.75
15:51	18.40	18.18	18.99	18.63	18.86
15:54	18.54	18.29	19.11	18.77	18.99
15:57	18.61	18.40	19.19	18.84	19.09
16:00	18.67	18.50	19.30	18.90	19.15
16:03	18.78	18.55	19.42	19.04	19.21
16:06	18.92	18.66	19.54	19.20	19.36
16:09	19.07	18.82	19.66	19.34	19.45
16:12	19.14	18.95	19.75	19.44	19.57
16:15	19.24	19.01	19.86	19.58	19.65
16:18	19.37	19.06	19.95	19.73	19.80
16:21	19.49	19.14	20.05	19.84	19.87
16:24	19.60	19.22	20.17	19.87	19.99
16:27	19.72	19.34	20.25	19.98	20.13

Anexo C. Tabla completa de telemetría — Parte II

Hora	Camión 1	Camión 2	Camión 3	Camión 4	Camión 5
16:30	19.86	19.44	20.31	20.01	20.26
16:33	19.94	19.49	20.43	20.10	20.41
16:36	20.03	19.58	20.56	20.27	20.49
16:39	20.13	19.65	20.63	20.33	20.56
16:42	20.20	19.79	20.75	20.39	20.65
16:45	20.35	19.91	20.83	20.52	20.72
16:48	20.44	20.03	20.89	20.63	20.80
16:51	20.50	20.07	20.98	20.69	20.86
16:54	20.60	20.22	21.09	20.84	21.01
16:57	20.66	20.27	21.20	21.00	21.13
17:00	20.73	20.40	21.28	21.15	21.19
17:03	20.81	20.50	21.35	21.32	21.28
17:06	20.88	20.58	21.45	21.44	21.42
17:09	20.94	20.68	21.54	21.59	21.48
17:12	21.01	20.73	21.63	21.73	21.56
17:15	21.12	20.85	21.75	21.80	21.70
17:18	21.18	20.99	21.86	21.96	21.78
17:21	21.28	21.13	21.94	22.02	21.88
17:24	21.39	21.26	22.01	22.11	21.99
17:27	21.53	21.37	22.14	22.16	22.08
17:30	21.66	21.45	22.22	22.27	22.19
17:33	21.71	21.52	22.32	22.34	22.29
17:36	21.82	21.57	22.45	22.49	22.40
17:39	21.94	21.71	22.57	22.60	22.46
17:42	22.07	21.77	22.63	22.65	22.55
17:45	22.21	21.82	22.77	22.76	22.70
17:48	22.30	21.93	22.86	22.86	22.81
17:51	22.37	22.02	22.93	22.93	22.93
17:54	22.48	22.09	23.02	23.10	23.07
17:57	22.55	22.15	23.09	23.25	23.20
18:00	22.70	22.24	23.22	23.32	23.32
18:03	22.78	22.29	23.29	23.48	23.46
18:06	22.90	22.37	23.38	23.57	23.57
18:09	23.00	22.43	23.50	23.67	23.71
18:12	23.10	22.56	23.61	23.78	23.83
18:15	23.23	22.64	23.72	23.81	23.97

Hora	Camión 1	Camión 2	Camión 3	Camión 4	Camión 5
18:18	23.29	22.73	23.80	23.97	24.03
18:21	23.41	22.89	23.86	24.12	24.15
18:24	23.55	22.93	23.96	24.21	24.26
18:27	23.68	23.06	24.02	24.33	24.38
18:30	23.83	23.12	24.12	24.50	24.49
18:33	23.96	23.23	24.19	24.58	24.56
18:36	24.09	23.32	24.27	24.67	24.68
18:39	24.16	23.44	24.38	24.76	24.79
18:42	24.30	23.55	24.47	24.91	24.84
18:45	24.37	23.65	24.56	25.02	24.98
18:48	24.47	23.74	24.62	25.16	25.08
18:51	24.54	23.81	24.72	25.28	25.19
18:54	24.64	23.90	24.81	25.43	25.29
18:57	24.72	24.06	24.93	25.53	25.37

Anexo C. Tabla completa de telemetría — Parte III

Hora	Camión 1	Camión 2	Camión 3	Camión 4	Camión 5
19:00	24.69	23.98	24.88	25.56	25.37
19:03	24.65	23.97	24.89	25.59	25.41
19:06	24.57	23.92	24.90	25.53	25.34
19:09	24.50	23.87	24.86	25.46	25.30
19:12	24.43	23.84	24.77	25.40	25.25
19:15	24.41	23.83	24.68	25.34	25.29
19:18	24.40	23.86	24.74	25.34	25.30
19:21	24.40	23.85	24.76	25.38	25.34
19:24	24.33	23.79	24.68	25.32	25.26
19:27	24.38	23.73	24.63	25.33	25.26
19:30	24.41	23.68	24.57	25.24	25.22
19:33	24.40	23.70	24.54	25.21	25.20
19:36	24.38	23.74	24.56	25.19	25.17
19:39	24.37	23.76	24.58	25.14	25.17
19:42	24.36	23.69	24.59	25.18	25.20
19:45	24.26	23.70	24.61	25.13	25.13
19:48	24.21	23.64	24.55	25.08	25.17
19:51	24.24	23.62	24.55	25.06	25.20
19:54	24.22	23.64	24.47	24.97	25.24
19:57	24.21	23.58	24.48	25.00	25.28
20:00	24.17	23.58	24.43	24.96	25.18
20:03	24.09	23.60	24.46	24.92	25.13
20:06	24.01	23.61	24.46	24.84	25.05
20:09	24.00	23.55	24.40	24.82	24.99
20:12	23.96	23.57	24.34	24.85	24.93
20:15	23.99	23.52	24.33	24.85	24.92
20:18	24.03	23.44	24.37	24.82	24.89
20:21	23.93	23.41	24.28	24.85	24.81
20:24	23.90	23.38	24.19	24.86	24.85
20:27	23.80	23.41	24.09	24.80	24.83
20:30	23.83	23.45	24.14	24.76	24.83
20:33	23.76	23.49	24.16	24.68	24.87
20:36	23.68	23.46	24.17	24.64	24.84
20:39	23.64	23.46	24.12	24.56	24.79
20:42	23.69	23.43	24.05	24.57	24.74
20:45	23.65	23.43	24.09	24.52	24.77

Hora	Camión 1	Camión 2	Camión 3	Camión 4	Camión 5
20:48	23.66	23.39	24.05	24.50	24.77
20:51	23.58	23.41	24.02	24.44	24.81
20:54	23.52	23.39	24.03	24.37	24.79
20:57	23.49	23.43	23.96	24.37	24.73
21:00	23.46	23.35	23.99	24.39	24.64
21:03	23.50	23.37	23.96	24.34	24.65
21:06	23.55	23.35	23.93	24.30	24.63
21:09	23.47	23.35	23.86	24.28	24.57
21:12	23.41	23.33	23.77	24.29	24.61
21:15	23.44	23.26	23.82	24.25	24.51
21:18	23.43	23.22	23.84	24.25	24.46
21:21	23.47	23.14	23.76	24.16	24.41
21:24	23.39	23.09	23.70	24.15	24.41
21:27	23.43	23.07	23.72	24.14	24.33

Anexo D. Formato de captura para el piloto

Campo	Registro
Código de lote	_____
Productor	_____
Fecha / hora de cosecha	_____
Hora de cargue	_____
Vehículo	_____
Masa inicial (kg)	_____
Temperatura inicial núcleo	_____
HR inicial	_____
Tipo de embalaje	_____
Manta reflectante	Sí / No
Hora de salida	_____
Hora de llegada	_____
Masa recibida (kg)	_____
Masa rechazada (kg)	_____
Daño mecánico promedio (0–4)	_____
Temperatura máxima	_____
Observaciones	_____

Este formato permite cerrar el ciclo de investigación: cada viaje produce datos físicos, económicos y de calidad que pueden ser comparados con el tratamiento control.

Anexo E. Nota de uso académico y control de calidad

Este documento fue elaborado como una versión ampliada y más estructurada del material suministrado. Conserva sus principales conceptos, cifras de escenario y datos de telemetría, pero reorganiza la argumentación para distinguir evidencia, cálculo y proyección. No se debe citar como evidencia experimental primaria de una reducción de merma hasta que el protocolo de validación haya sido ejecutado con datos de campo.

Antes de una entrega universitaria formal se recomienda reemplazar el campo de autor, incorporar la institución, programa académico, director, fecha de sustentación y estilo bibliográfico exigido. También se recomienda revisar cada referencia con el formato solicitado por la institución y añadir los datos primarios de cualquier ensayo realizado posteriormente.

FIN DEL ARTÍCULO